

# Contribuição aos estudos da evolução da escarpa entre as bacias hidrográficas dos rios Doce e Paraíba do Sul, na Serra da Mantiqueira-MG-Brasil

**Breno Ribeiro Marent**

Universidade Federal de Minas Gerais – Brasil

**Roberto Célio Valadão**

Universidade Federal de Minas Gerais – Brasil

p. 417-434

revista

**Geo**   
**USP**  
espaço e tempo

Volume 23 • nº 2 (2019)

ISSN 2179-0892

## Como citar este artigo:

MARENT, B. R.; VALADÃO, R. C. Contribuição aos estudos da evolução da escarpa entre as bacias hidrográficas dos rios Doce e Paraíba do Sul, na Serra da Mantiqueira-MG-Brasil. **Geosp – Espaço e Tempo** (Online), v. 23, n. 2, p. 417-434, ago. 2019. ISSN 2179-0892.

Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/geosp/article/view/137398>. doi: <https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geosp.2019.137398>.



Este artigo está licenciado sob a Creative Commons Attribution 4.0 License.

# Contribuição aos estudos da evolução da escarpa entre as bacias hidrográficas dos rios Doce e Paraíba do Sul, na Serra da Mantiqueira-MG-Brasil<sup>1</sup>

---

## Resumo

A Serra da Mantiqueira, no estado de Minas Gerais, constitui escarpa que separa bacias hidrográficas posicionadas em diferentes degraus topográficos, de modo que a bacia do rio Doce se encontra em nível altimétrico superior e a do Paraíba do Sul, em nível inferior. Na área da escarpa, vales suspensos são o registro mais marcante da evolução dessas bacias pela manifestação de capturas fluviais. Este trabalho investigou a evolução recente dessa escarpa com base no quadro geomorfológico no qual se insere, bem como na análise de dados geocronológicos secundários. Os resultados demonstraram que a escarpa investigada evolui por capturas fluviais por meio da associação espaço-temporal de processos de downwearing e backwearing. Esses processos se propagam a remontante da zona de knickpoint ao longo do canal fluvial principal e de seus tributários. Considera-se também a importância dos processos de vertente, os quais conduzem à ampliação lateral dos vales e ao consequente entulhamento do canal principal, uma resposta da dinâmica geomorfológica na tentativa de se ajustar ao novo nível de base pós-captura.

**Palavras-chave:** Vale suspenso. Captura fluvial. Knickpoint. Incisão vertical. Retração lateral.

---

## Contributions to studies on the evolution of the escarpment between the rivers basins of the Doce and Paraíba do Sul, in the Serra da Mantiqueira, Minas Gerais-Brazil

---

<sup>1</sup> Agradecemos ao subsídio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pela concessão de bolsa de doutorado ao primeiro autor. Processo n. 1171475.

---

## Abstract

The Serra da Mantiqueira, in the state of Minas Gerais, constitute an escarpment separating river basins located into distinct topographic steps, with the Doce river basin on the upper altimetric level and the Paraíba do Sul river basin on the lower level. In the escarpment area, hanging valleys provide the most striking record of the evolution of these basins, which occur through river capture. The present study investigated the recent evolution of this escarpment based on geomorphological elements and secondary geo-chronological data. The results demonstrate that the escarpment investigated evolved through river capture from downwearing and backwearing. These spread the upstream in the knickpoint zone along the principal channel and the tributaries. The importance of the action of the slope should also be considered. These processes lead to the lateral enlargement of the valley and the consequent build-up of debris in the principal channel, a response of geomorphological dynamics in the quest to adjust to the new post-capture base level.

**Keywords:** Hanging valley. River capture. Knickpoint. Downwearing. Backwearing.

---

## Contribution aux études sur l'évolution de l'escarpement entre les bassins des fleuves Doce et Paraíba do Sul, Serra da Mantiqueira, Minas Gerais-Brésil

---

### Résumé

La Serra da Mantiqueira, située dans l'état du Minas Gerais (Brésil), est un escarpement qui sépare les bassins versants positionnés sur différentes marches topographiques, de sorte que le bassin du fleuve Doce se situe à un niveau altimétrique supérieur à celui du Paraíba do Sul. Dans la région de l'escarpement, les vallées suspendues constituent le témoignage le plus remarquable de l'évolution de ces bassins à travers la manifestation des captures fluviales. Ce travail a étudié l'évolution récente de cet escarpement à partir du cadre géomorphologique dans lequel il est inséré, ainsi que de l'analyse des données géochronologiques secondaires. Les résultats ont démontré que l'escarpement étudié évoluait en fonction des captures, grâce à l'association spatio-temporelle des processus de downwearing et de backwearing. Ces processus se propagent

en amont de la zone de knickpoint le long du principal cours d'eau et de ses affluents. On considère également l'importance des processus de pente, ce qui a conduit à l'élargissement latéral des vallées et à l'envasement des principaux cours d'eau, une réponse de la dynamique géomorphologique de l'ajustement au nouveau niveau de base post-capture.

**Mots-clés:** Vallée suspendue. Capture fluviale. Knickpoint. Incision verticale. Rétraction latérale.

---

## Introdução

Elucidar a evolução de escarpas situadas em posição adjacente a margens continentais passivas tem se tornado um desafio aos geocientistas. Concepções inicialmente propostas para a evolução desses ressaltos topográficos se baseiam, fundamentalmente, no recuo lateral contínuo das escarpas graças às maiores taxas de denudação vigentes nas zonas de mais elevado gradiente (Thomas; Summerfield, 1987; Macedo, 1989; Gilchrist; Summerfield, 1990; Ollier; Pain, 1997). Não obstante, concepções posteriores advogam que essas escarpas teriam sua evolução a partir da degradação do planalto por incisão vertical da rede de drenagem e, conseqüentemente, sua localização no relevo regional seria mantida concomitantemente ao aumento de seu desnível topográfico (Gilchrist; Kooi; Beaumont, 1994; Van Der Beek et al., 2002).

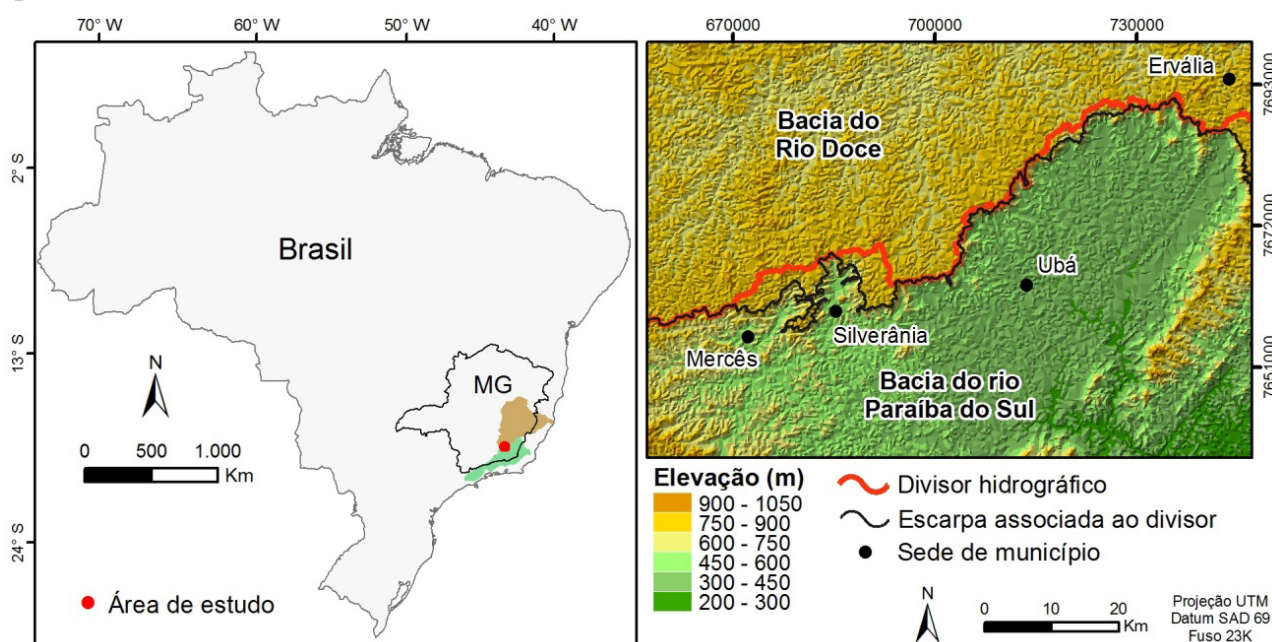
Essas distintas concepções, ou seja, de recuo lateral da escarpa e de degradação do planalto por incisão da rede de drenagem, reportam-se comumente à escala temporal de longo-termo. Todavia, há autores que advogam que a temporalidade de evolução dessas escarpas se manifesta também na escala de tempo recente, tal como proposto por Vanacker et al. (2007), Prince, Spotila e Henika (2010), Gunnell e Harbor (2010) e Salgado et al. (2014), entre outros.

Em alguns desses trabalhos essa evolução recente da escarpa se faz mediante processo de recuo lateral contínuo (Vanacker et al., 2007; Salgado et al., 2014), embora em outros se propõe que essa evolução recente ocorra por meio da incisão vertical em que capturas fluviais são acompanhadas pelo rearranjo da rede hidrográfica (Prince; Spotila; Henika, 2010; Gunnell; Harbor, 2010). Salgado et al. (2012) propuseram ainda que as escarpas evoluem pela associação entre retração lateral (*backwearing*) e incisão vertical (*downwearing*). O fato é que o conjunto das diferentes concepções salientadas até aqui acaba criando amplo espectro de possibilidades que podem se manifestar na evolução das escarpas em tela. É nesse contexto que se insere este trabalho, cujo objetivo é investigar a evolução quaternária de trecho da escarpa da Serra da Mantiqueira situada em território mineiro, com base em seus atributos geomorfológicos e na análise de dados geocronológicos secundários.

A área de estudo se situa no contexto dos planaltos escalonados do sudeste do estado de Minas Gerais e está inserida na porção da escarpa da Serra da Mantiqueira, que separa as bacias hidrográficas dos rios Doce e Paraíba do Sul (Figura 1). Essas bacias compreendem trechos do alto rio Doce e rio Pomba, no rio Paraíba do Sul. O relevo do sudeste

de Minas Gerais é caracterizado por planaltos escalonados, separados por escarpas, que se associam às principais bacias hidrográficas da região. Esses planaltos consistem em um degrau superior nas bacias dos rios São Francisco e Paraná, um degrau intermediário na bacia do rio Doce e um degrau inferior na bacia do rio Paraíba do Sul (Cherem et al. 2012, 2013; Marent; Valadão, 2015). Cherem et al. (2012) verificaram, por taxas de denudação ( $^{10}\text{Be}$ ), que as bacias que se encontram em nível inferior estão avançando sobre as do nível superior. Nas escarpas, a regressão remontante das cabeceiras de drenagem é responsável por capturas fluviais, principal processo de evolução dessas bacias (Cherem et al., 2013). A borda das escarpas que separam os degraus é marcada ainda pela presença frequente de vales suspensos de diferentes dimensões, alguns deles associados a capturas fluviais (Marent; Valadão, 2015).

**Figura 1 – Localização da área de estudo no contexto da Serra da Mantiqueira-MG**



## Material e métodos

A execução deste trabalho se pautou, inicialmente, na análise de modelos de evolução de bordas escarpadas (Prince; Spotila; Henika, 2010; Salgado et al., 2012) e de dados geocronológicos de isótopos cosmogênicos ( $^{10}\text{Be}$ ) apresentados na Tabela 1 (Vanacker et al. 2007; Salgado et al., 2012). Esses modelos e dados subsidiaram a elaboração de perfis esquemáticos, cujo objetivo foi favorecer a análise comparada de diferentes propostas de evolução de escarpas (Figura 2).

Na elaboração desses perfis esquemáticos, a compilação dos dados da Tabela 1 empregou a associação das médias de denudação calculadas para cada um dos diferentes compartimentos das bordas escarpadas, os quais, em síntese, expressam taxas distintas de denudação. Nos perfis então elaborados, essas taxas foram distinguidas em baixa, média e alta, utilizando-se de setas que variam em tamanho e espessura.



Na etapa seguinte foram utilizados dados geocronológicos de isótopos cosmogênicos ( $^{10}\text{Be}$ ) (Cherem et al., 2012), reunidos na Tabela 1, e de Luminescência Opticamente Estimulada – LOE (Oliveira et al., 2018), reunidos na Tabela 2, obtidos em capturas fluviais situadas na área de estudo (Figura 1). Esses dados foram então comparados quanto a suas variáveis topográficas na borda escarpada, com vistas a sua análise conjunta com a evolução esquemática do perfil longitudinal de drenagem (Figura 3). Uma seção longitudinal do canal foi compilada a partir de perfis de capturas fluviais (Figura 4) em diferentes estágios de evolução (Cherem et al., 2013), em escala local, e com a evolução esquemática de seção topográfica de bacia costeira (Van Der Beek et al., 2002), em escala regional.

Foi selecionada, na área de estudo, um trecho escarpado da Serra da Mantiqueira situado nas proximidades de Mercês e Silverânea, onde se efetivou a análise morfométrica de dois cursos fluviais (Figuras 1 e 5). Esses cursos exibem vales fluviais em avançado estágio de degradação e, por estarem associados a capturas de drenagem, favorecem sua comparação aos dados geocronológicos já referidos. Foram elaborados, ainda, dois perfis geológicos orientados segundo os principais canais fluviais que drenam o trecho selecionado, na busca de subsidiar as argumentações exaradas (Figura 6). Com base nesse conjunto de elementos e no esquema de evolução de vales fluviais proposto por Seidl et al. (1996) e Marent et al. (2018), foi proposto modelo de evolução preliminar em bordas escarpadas (Figura 7). Esse modelo foi concebido por meio de seção longitudinal e vertical do canal fluvial.

## Resultados e discussão

As escarpas na área de estudo são marcadas por vales suspensos de diferentes dimensões situados entre o divisor hidrográfico e a escarpa (Figura 1). Nesses vales suspensos, é comum a presença de indicadores geomorfológicos quanto a ocorrência de capturas fluviais, a exemplo de inflexões bruscas de drenagem e de amplos vales fluviais cuja dimensão é desproporcional aos canais fluviais atuais que drenam a bacia adjacente. Essa associação manifestada na área investigada entre escarpas e divisor hidrográfico conduziu os autores do presente trabalho na busca de condições similares até então verificadas por outros pesquisadores nacionais e estrangeiros.

Vanacker et al. (2007) mensuraram taxas de denudação por isótopos cosmogênicos ( $^{10}\text{Be}$ ) em borda de escarpas que morfologicamente se enquadram no contexto de capturas fluviais (Tabela 1), em configuração geomorfológica semelhante àquela aqui investigada. Com base nas taxas mais elevadas das escarpas em relação ao planalto situado topograficamente acima os autores citados concluíram que essas evoluem por backwearing (recuo lateral) e que a variabilidade da taxa de denudação é dependente do gradiente da encosta (Figura 2-A). Esses dados sugerem duas situações geomorfológicas discrepantes, uma verificável na escarpa que coincide com o divisor e outra no divisor situado mais para o interior em relação à escarpa. Apesar de Vanacker e seus colaboradores não haverem tratado especificamente de capturas fluviais, o contexto geomorfológico que retratam deixa ver sua presença e relevância, notadamente ao identificarem canais de drenagem que fluem em direção à escarpa a partir de divisores hidrográficos posicionados para além delas.

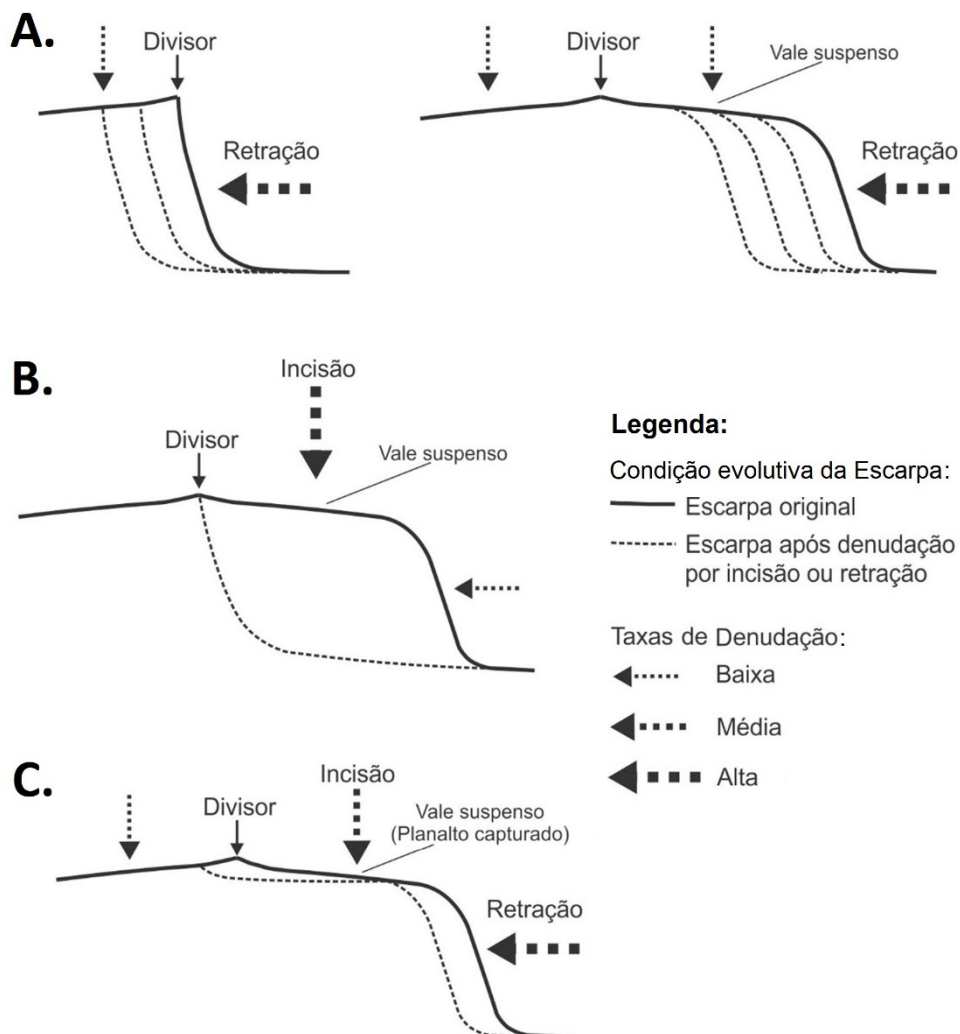
**Tabela 1 – Taxas de denudação por isótopo cosmogênico ( $^{10}\text{Be}$ ) aferidas em diferentes compartimentos do relevo marcado pela presença de escarpas, segundo autores diversos**

	Amostra	Área (km <sup>2</sup> )	Compartimento do relevo drenado	Concen- tração <sup>10</sup> Be (at/g)	Taxa de denuda- ção (m/ Ma)	Média das taxas de denudação (m/Ma)
Vanacker et al. (2007)	HP-3	0,26	planalto	25,84 ± 0,65	4,12 ± 0,50	4,12
	HP-2	5,50	vale suspenso	30,03 ± 0,60	3,55 ± 0,40	4,03
	BO-U1	1,18	vale suspenso	30,27 ± 1,12	3,49 ± 0,42	
	HP-1	0,70	vale suspenso	39,56 ± 0,88	2,62 ± 0,30	
	HP-4	0,39	vale suspenso	36,00 ± 0,76	2,90 ± 0,34	
	BO-U2	1,21	vale suspenso	21,19 ± 0,74	4,97 ± 0,59	
	BO-U3	0,40	vale suspenso	27,74 ± 0,83	3,77 ± 0,44	
	BO-U5	0,19	vale suspenso	17,48 ± 0,60	6,24 ± 0,74	
	BO-U4	16,96	vale suspenso	23,01 ± 1,80	4,72 ± 0,67	
	BO-R2F	22,96	escarpa + vale suspenso	7,32 ± 0,48	15,30 ± 1,80	15,3
	KO-R1F	0,15	escarpa	1,25 ± 0,22	66,00 ± 13,20	46,40
	KO-F4	0,31	escarpa	1,45 ± 0,14	55,30 ± 7,60	
	KO-T1	0,36	escarpa	1,06 ± 0,11	70,90 ± 10,80	
	KO-G1	0,92	escarpa	3,22 ± 0,27	25,90 ± 3,60	
	KO-G3	0,38	escarpa	1,77 ± 0,21	33,20 ± 5,20	
	BO-F2F	1,74	escarpa	1,79 ± 0,17	49,00 ± 7,00	
	BO-F1	1,12	escarpa	1,33 ± 0,18	44,40 ± 7,60	
	ESP-5	19,82	escarpa	2,01 ± 0,17	36,60 ± 5,00	
	ESP- 3	2,29	escarpa	1,77 ± 0,17	36,50 ± 5,30	

Salgado et al. (2012)	PB7	7,60	planalto	$11,10 \pm 0,34$	$3,95 \pm 0,12$	5,22
	PB8	15,20	planalto	$7,56 \pm 1,86$	$6,49 \pm 1,60$	
	PB1	1,90	vale suspenso (planalto capturado)	$4,41 \pm 0,15$	$10,74 \pm 0,37$	11,35
	PB4	0,50	vale suspenso (planalto capturado)	$4,28 \pm 0,13$	$11,95 \pm 0,37$	
	PB2	4,80	escarpa + vale suspenso	$2,73 \pm 0,11$	$17,25 \pm 0,71$	17,08
	PB3	2,70	escarpa + vale suspenso	$2,84 \pm 0,15$	$17,50 \pm 0,92$	
	PB5	22,80	escarpa + vale suspenso	$3,11 \pm 0,10$	$16,50 \pm 0,50$	
Cherem et al. (2012)	D1	5,90	planalto	$3,43 \pm 0,11$	$11,18 \pm 0,04$	12,55
	D2	5,80	planalto	$3,92 \pm 0,12$	$9,42 \pm 0,03$	
	D3	7,80	planalto	$2,80 \pm 0,09$	$13,76 \pm 0,06$	
	D4	10,60	planalto	$2,07 \pm 0,07$	$19,30 \pm 0,13$	
	D5	2,60	planalto	$4,26 \pm 0,19$	$9,09 \pm 0,03$	
	P6	2,50	vale suspenso (planalto capturado)	$3,12 \pm 0,21$	$12,82 \pm 0,12$	12,82
	P1	4,40	escarpa + vale suspenso	$1,83 \pm 0,08$	$20,08 \pm 0,16$	21,58
	P2	5,90	escarpa + vale suspenso	$1,62 \pm 0,15$	$23,07 \pm 0,26$	
	P3	7,70	escarpa	$2,05 \pm 0,16$	$17,79 \pm 0,34$	15,81
	P4	10,00	escarpa	$2,48 \pm 0,12$	$14,44 \pm 0,19$	
	P5	3,00	escarpa	$2,37 \pm 0,17$	$15,20 \pm 0,12$	



**Figura 2 – Variabilidade das taxas de denudação aferidas em compartimentos do relevo marcado pela presença de escarpas, segundo distintas configurações geomorfológicas – A, B e C**



fonte: Elaborada a partir de Vanacker et al. (2007), Prince, Spotila e Henika (2010) e Salgado et al. (2012).

A partir da investigação da morfologia de canais fluviais e de seus depósitos em borda de escarpa, Prince, Spotila e Henika (2010) elaboraram modelo conceitual de evolução de capturas fluviais mediante emprego de modelagem numérica e de dados geocronológicos secundários. Esses autores consideraram que, após evento de captura, a porção montante da escarpa passaria a receber fluxos hídricos advindos da área do planalto recém anexado, fluxos estes capazes de produzir maior denudação por incisão vertical (downwearing) (Figura 2-B). Esse fato conduziria à dissecação da área capturada do planalto até seu rebaixamento e à incorporação à superfície topográfica inferior, o que resultaria na migração da escarpa e ao seu ajuste gradativo ao divisor hidrográfico.

No contexto dos degraus escalonados do sudeste de Minas Gerais, notadamente entre as bacias hidrográficas dos rios Paraná e Doce, Salgado et al. (2012) investigaram diferentes compartimentos do relevo com base em análises morfológicas e taxas denudacionais de isótopo cosmogênico ( $^{10}\text{Be}$ ). Esses autores concluíram que a borda da escarpa por eles investi-

gada, após sofrer captura fluvial, teria evoluído segundo duplo front constituído pela ação do backwearing nas porções escarpadas em que vigoram taxas de denudação mais elevadas, concomitantemente ao downwearing das áreas submetidas à captura fluvial, onde foram aferidas taxas de denudação mais baixas. Estas últimas, porém, se revelaram mais elevadas que aquelas do planalto da bacia adjacente (Figura 2-C).

Embora os modelos anteriormente discutidos assumam distintas particularidades, são eles produtores de escarpas morfometricamente semelhantes, apesar das diferentes taxas de denudação aferidas pelos seus autores para cada compartimento do relevo (Tabela 1 e Figura 2). A diferenciação fundamental entre esses compartimentos está associada ao papel exercido pela rede de drenagem, tal como já mencionado por autores que se dedicaram à investigação do relevo adjacente a margens continentais passivas de grande elevação que apresentam divisores hidrográficos situados a dezenas de quilômetros do litoral, a exemplo de Gilchrist, Kooi e Beaumont (1994), Seidl, Wiessel e Pratson (1996), Van der Beek et al. (2002) e Matmon, Bierman e Enzel (2002). Esses autores reconheceram diferenciações significativas quanto à organização regional da rede hidrográfica, concluindo que os canais fluviais que drenam o planalto em direção à escarpa, ao partirem de divisor hidrográfico situado no interior continental, registram maior taxa de denudação por incisão vertical que aquelas vigentes em escarpas coincidentes com o divisor hidrográfico e que evoluem por retração lateral. Essas condições se justificam pela própria configuração geomorfológica da escarpa. No caso da escarpa que coincide com o divisor hidrográfico, desenvolvem-se fluxos efêmeros em posição de cabeceiras, caracterizados pela baixa capacidade de degradação do canal. Porém, essa porção elevada da escarpa tende a exibir significativa denudação (Tabela 1) em virtude do gradiente elevado que favorece a retirada de material, sobretudo por meio de movimentos de massa. Já naquelas escarpas drenadas por fluxos advindos do planalto submetido à captura fluvial, a drenagem é comumente efetivada por canais permanentes e de maior capacidade de incisão no knickpoint formado no flanco da escarpa. Todavia, as taxas denudacionais ( $^{10}\text{Be}$ ) mencionadas na Tabela 1 contradizem essas condições descritas, uma vez que sugerem maior recuo das escarpas (backwearing) em relação à incisão vertical (downwearing).

Diante dessa contradição, foram agregados à análise em curso dados cronológicos obtidos mediante emprego do método LOE, aferidos por Oliveira et al. (2018). Esses autores investigaram as taxas de incisão vertical da rede hidrográfica em vales suspensos situados na área investigada neste trabalho, nas proximidades de Ervália e de Silverânea (Figura 1). Em Ervália a incisão vertical foi da ordem de 1,2 m em 2.800 anos (428 m/Ma), aferida no principal canal envolvido em recente captura fluvial posicionada a montante do knickpoint e inserida em um vale suspenso; já em Silverânea a incisão aferida foi de 10,0 m em 10.800 anos (925 m/Ma) (Tabela 2). Cherem et al. (2012) aferiram a taxa de denudação ( $^{10}\text{Be}$ ) nessa mesma escarpa, geomorfologicamente posicionada entre Ervália e Silverânea, concluindo que a média denudacional da escarpa é de 18,11 m/Ma. Porém, analisando essas taxas segundo os diferentes compartimentos da escarpa elas se apresentam com 15,81 m/Ma na escarpa cuja porção remontante coincide com divisor hidrográfico, no compartimento que engloba a escarpa e vale suspenso 21,58 m/Ma, e no planalto capturado 12,82 m/Ma. Embora haja discrepância entre as taxas aferidas segundo métodos cronológicos distintos, LOE e isótopo cosmogênico ( $^{10}\text{Be}$ ), a coleção desses dados confirma que o rebaixamento vertical do canal fluvial principal foi significativamente mais elevado que a taxa de retração lateral média das bacias hidrográficas analisadas (Figura 3). Esse fato confirma aspectos

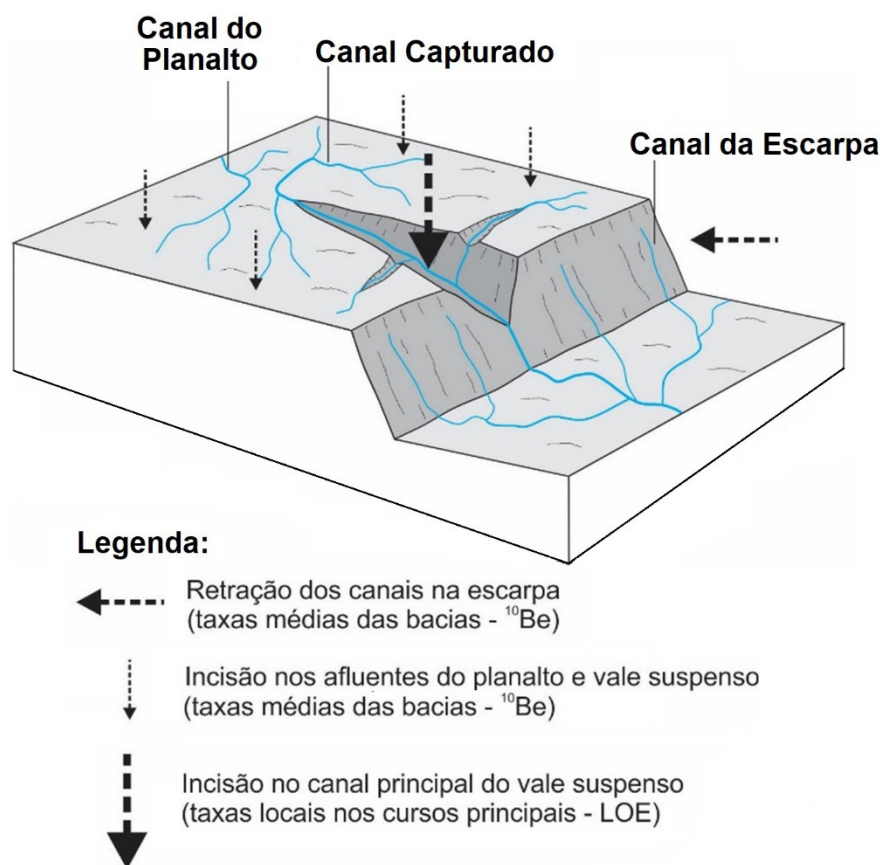
já salientados em modelos de evolução de escarpas propostos por Gilchrist, Kooi e Beaumont (1994), Van der Beek et al. (2002) e Prince, Spotila e Henika (2010). Não obstante, as baixas taxas de  $^{10}\text{Be}$  aferidas no planalto capturado (vale suspenso), por refletirem a média da bacia, decorrem, ao que tudo indica, da resposta mais lenta à denudação em relação à incisão do canal fluvial principal, como já salientado por Cherem et al. (2013).

**Tabela 2 – Idades de níveis deposicionais fluviais situados na escarpa da Serra da Mantiqueira, calculadas por método LOE**

Localização do nível deposicional fluvial coletado	Idade (anos)	Incisão do canal (m/Ma)	Desnível do ponto de coleta para o rio atual (m)	Desnível da base do nível deposicional para o rio atual (m)
vale suspenso rio São Manuel (próximo a Silverânea)	$10.000 \pm 1200$	925	~10	~10
vale suspenso rio dos Bagres (próximo a Ervália)	$2.800 \pm 400$	428	1,2	nenhum

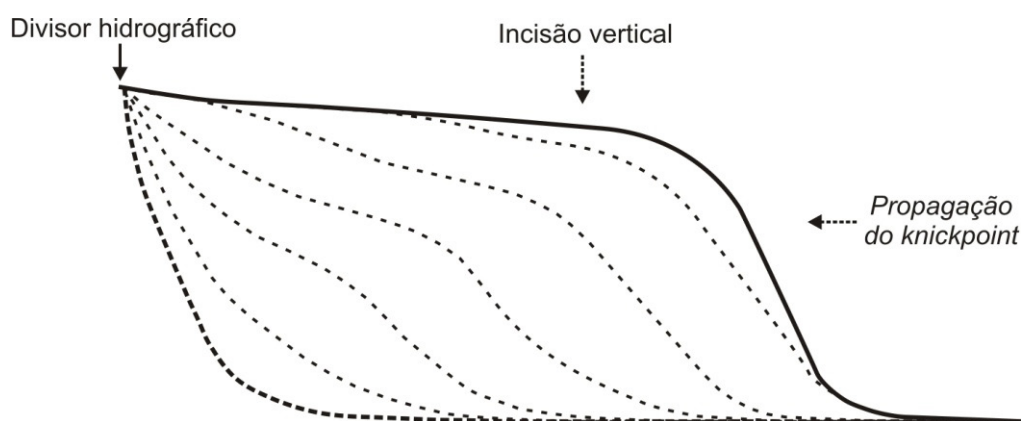
fonte: Oliveira et al. (2018).

**Figura 3 – Tipologia da denudação vigente nos compartimentos geomorfológicos associados à escarpa da Serra da Mantiqueira, segundo dados geocronológicos de  $^{10}\text{Be}$  e LOE**



Ao analisar a morfologia de seções longitudinais de diversos canais fluviais na área aqui investigada, Cherem et al. (2013) procuraram reconhecer os processos de dissecação e rebaixamento do relevo que conduzem gradativamente essas seções à forma côncava para cima (Figura 4). De acordo Mather (2000) e Cherem et al. (2013), o canal fluvial, após sua captura, é gradativamente rebaixado de jusante para montante, mediante migração do knickpoint e da frente da escarpa, de modo que o vale acima do ponto de captura passa por encaixamento gradual que se propaga remontantemente. Esse processo leva ao recuo da escarpa em direção ao divisor hidrográfico e se revela coerente com as taxas denudacionais aferidas por  $^{10}\text{Be}$  e LOE, já explicitadas, e, ao que tudo indica, se faz mediante atuação conjunta das condições de backwearing e downwearing (Figura 4).

**Figura 4 – Sequência evolutiva hipotética de seção longitudinal de canal fluvial em área de captura fluvial, cujo traçado em planta corta perpendicularmente uma escarpa**

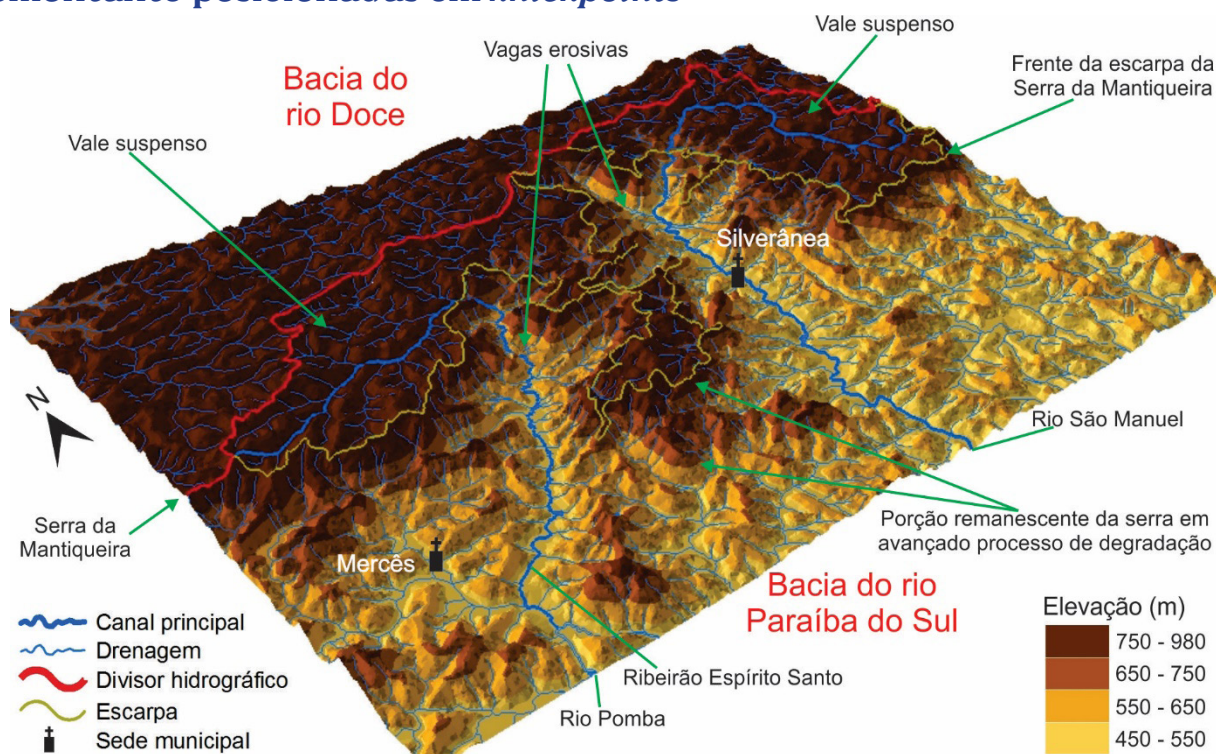


fonte: Elaborada a partir de seção topográfica produzida por Van der Beek et al. (2002) e de perfis longitudinais de Cherem et al. (2013).

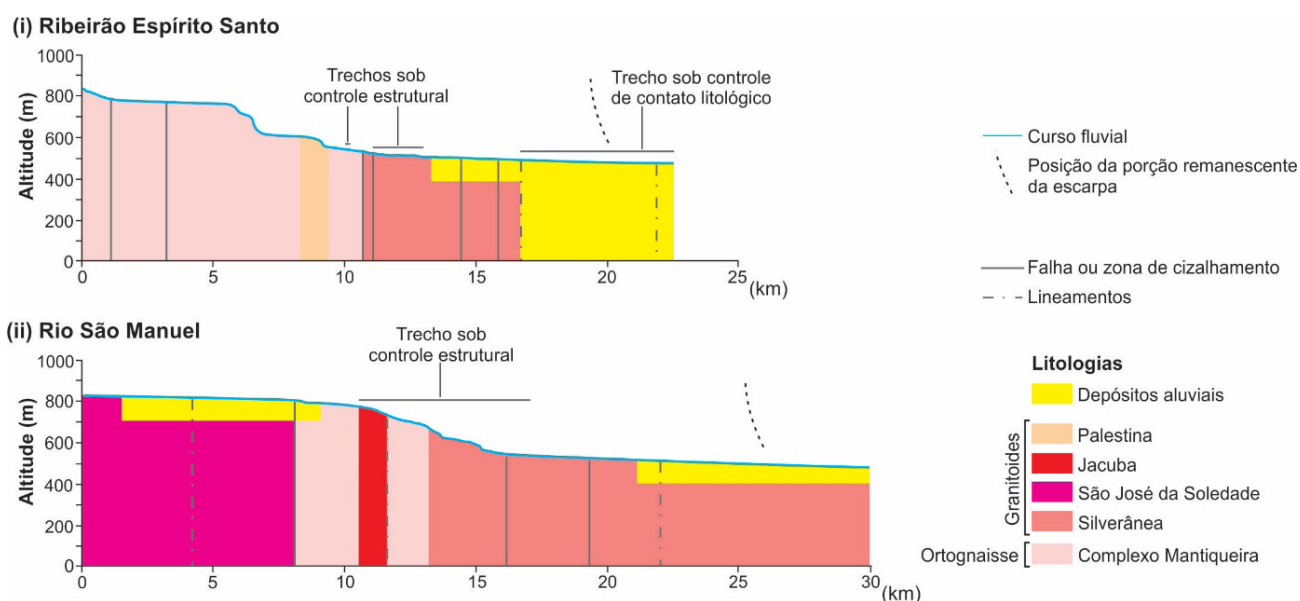
A fim de melhor compreender os processos até então aqui discutidos acerca da formação da escarpa da Serra da Mantiqueira, foram selecionados os vales do ribeirão Espírito Santo e do rio São Manuel, nas proximidades de Mercês e Silverânea (Figura 1), investigados por Oliveira (2012) e Oliveira et al. (2018). Submetidos a capturas fluviais, esses vales se encontram hoje geomorfologicamente em avançado estado de degradação, em que vagas erosivas se propagam a montante a partir do eixo longitudinal do canal fluvial principal rebaixado (Figura 5). A jusante, se revelam encaixados e profundos, ao passo que a montante contêm knickpoints situados acima da escarpa na passagem do vale encaixado para o vale suspenso. A captura identificada por Oliveira (2012) como em estágio mais avançado de desenvolvimento é aquela do ribeirão Espírito Santo, a qual exhibe em sua cabeceira a formação de escarpa incipiente e knickpoint mais degradado (Figura 6). Na captura em estágio mais recente, no rio São Manuel, há diferenciação quanto a essas condições geomorfológicas, uma vez que nas porções do vale em que os canais principais já se encontram mais ajustados ao novo nível de base ocorrem acumulações aluviais de planície e antigos níveis deposicionais decorrentes da incisão do canal principal, conforme verificado por Oliveira (2012) e Oliveira et al. (2014).



**Figura 5 – Modelo digital de elevação de trecho da escarpa da Serra da Mantiqueira, no sudeste de Minas Gerais, com destaque para os vales do ribeirão Espírito Santo e do rio São Manuel. As características morfo-métricas desses vales são diagnósticas da ocorrência de capturas fluviais, a exemplo de cotovelos de drenagem, vales suspensos e de vagas de erosão remontante posicionadas em *knickpoints***



**Figura 6 – Geologia das seções longitudinais do ribeirão Espírito Santo (i) e do rio São Manuel (ii), nas proximidades de Mercês e Silverânea (Serra da Mantiqueira)**



fonte: Informações geológicas obtidas em carta geológica na escala 1:100.000, de autoria de Brandalise e Viana (1993).

Ao longo das seções longitudinais do ribeirão Espírito Santo e do rio São Manuel, ocorrem alguns corpos intrusivos (Figura 6), os quais se estendem para as porções mais elevadas em que ocupam as frentes da escarpa (Figura 5). Marent e Valadão (2015) associaram esses corpos intrusivos à sustentação das frentes escarpadas, em razão de sua presença frequente associada a relevos mais elevados em relação ao entorno ocupado por ortognaisses do Complexo Mantiqueira. Como demonstrado pela geologia das seções longitudinais, em alguns trechos a montante dos canais fluviais ocorrem granitoides associados a knickpoints, como também sustentando níveis de base locais. Não obstante, verifica-se no ribeirão Espírito Santo proeminente knickpoint que se manifesta em ortognaisses do Complexo Mantiqueira, rochas essas que comumente revelam menor resistência que os granitoides. Em ambas as seções, os trechos mais rebaixados de jusante ocorrem nas litologias do granitoide Silverânea, cuja extensão abrange porção remanescente da serra situada entre eles (Figura 5). As configurações geomorfológicas do ribeirão Espírito Santo e do rio São Manuel denotam o condicionamento lito-estrutural a que ambos estão submetidos, com destaque para trechos encaixados e retilíneos de seus vales. Marent e Valadão (2015) já haviam ressaltado o forte condicionamento estrutural vigente nessa área em conjugação ao maior vigor da incisão fluvial.

As características inerentes às configurações geomorfológica e geológica das seções longitudinais aqui tratadas, ao serem reunidas ao quadro até então discutido para a Serra Mantiqueira, introduzem elementos significativos aos modelos de evolução de escarpas em análise neste trabalho. A projeção da frente escarpada em relação ao avanço das vagas erosivas sugere que o recuo paralelo não constitui seu processo dominante (Figura 5), sendo esse recuo maior na escarpa na zona do knickpoint em que os fluxos são provenientes do planalto. Nessa zona, também ocorre maior incisão vertical, caracterizada pela passagem da superfície superior acima da escarpa para a superfície inferior. Os fluxos do canal principal que drenam o vale suspenso em direção à escarpa, por receberem a contribuição de diversos afluentes, exibem maior vigor denudacional decorrente de drenagem perene, como demonstrado pelos valores da LOE. Logo, a denudação e incisão na zona do knickpoint que marca a diferença de nível de base é consideravelmente maior que no restante da bacia, na qual foram registrados valores significativamente menores aferidos pelo  $^{10}\text{Be}$ , representando a média de toda a área de contribuição da bacia.

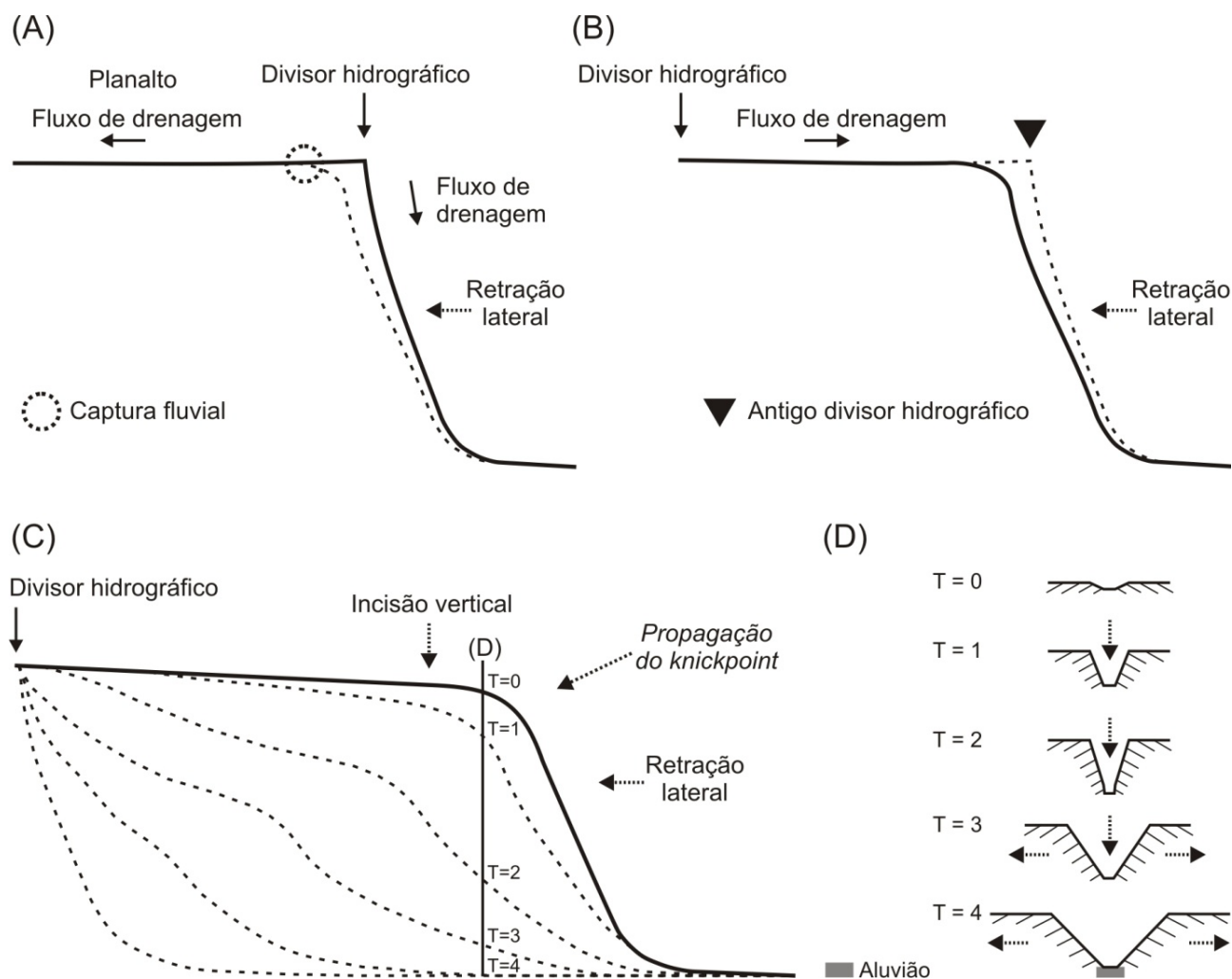
Esse conjunto de dados e informações sugere uma evolução em que se conjugam retração lateral e incisão vertical na propagação do knickpoint. No que se refere à incisão vertical, trabalhos desenvolvidos por Seidl, Wiessel e Pratson (1996) e Marent et al. (2018) diagnosticaram processo em que, após a passagem do knickpoint a jusante, há formação de um vale estreito em razão da incisão vertical, vale este que se amplia vertical e lateralmente na medida em que a ruptura de declive da seção longitudinal do canal fluvial se propaga a montante. Essa condição está de acordo com as taxas de denudação



aferidas por  $^{10}\text{Be}$  em diferentes domínios geomorfológicos, como também daquelas calculadas pelo método LOE no canal principal e nas áreas de incisão da drenagem proveniente do planalto.

Diante do exposto, concebe-se aqui uma organicidade quanto à evolução das porções escarpadas na área de estudo marcada, fundamentalmente, pela ocorrência de capturas fluviais, em que a configuração geomorfológica inicial contempla um divisor hidrográfico coincidente com a borda escarpada (Figura 7-A). Os vales suspensos têm sua origem por denudação mais agressiva da escarpa, em que os gradientes são mais elevados que aqueles vigentes no planalto que drena em direção ao interior. Uma vez ocorrida a captura, o divisor hidrográfico se desloca em direção ao interior do planalto graças à atuação de canais de drenagem que fluem em direção à escarpa, canais estes agora submetidos a novo nível de base (Figuras 7-B, 7-C e 7-D;  $T = 0$ ). O elevado gradiente da escarpa, agora drenada pelos canais recém capturados, conduz à rápida incisão vertical nas áreas de knickpoint com propagação a montante (Figuras 7-C e 7-D;  $T = 1$ ). A propagação remontante do knickpoint resulta no aprofundamento dos vales fluviais a montante e jusante deste (Figura 5), acompanhados pelo aumento da amplitude e declividade (Figura 7-C;  $T = 2$ ). O vale aberto por incisão vertical na fase anterior, aprofunda-se gradativamente com novo aumento de amplitude e declividade, o que leva à maior propensão à desestabilização das encostas e à ocorrência de processos modeladores de vertente ampliando a dimensão lateral do vale (Figuras 7-C e 7-D;  $T = 3$ ). Com o tempo a propagação do knickpoint a montante por recuo lateral e sua respectiva incisão vertical conduz à formação de nova escarpa no divisor hidrográfico (Figura 7-C;  $T = 4$ ). A ampliação do vale fluvial por processos de vertente resulta no seu entulhamento, ajustando-o ao novo nível de base (Figura 7-C e 7-D;  $T = 4$ ). Como os fluxos são concentrados no canal fluvial principal, este se ajusta primeiramente ao nível de base e, mais tarde e gradualmente, há o ajuste do restante da bacia, mediante degradação e rebaixamento de porções ainda remanescentes constituídas por knickpoints de tributários (Figura 5). A montante dos knickpoints, nas áreas mais distantes do canal principal e de seus tributários, se manifesta tempo de resposta mais lento quanto ao ajuste segundo novo nível de base. Durante esse processo, eventualmente podem ocorrer novas capturas fluviais.

**Figura 7 – Evolução da borda escarpada da Serra da Mantiqueira submetida à captura fluvial. Observe que, uma vez ocorrida a captura, é desencadeada uma complexidade de processos de retração lateral, incisão vertical e modeladores de vertente**



A evolução aqui evidenciada demonstra que a dinâmica de bordas escarpadas submetidas a capturas fluviais é complexa, envolvendo processos para além da mera retração ou incisão da rede hidrográfica. Durante essa evolução, atuam processos que se alternam no tempo e no espaço para diferentes porções da escarpa, cuja manifestação envolve condições geodinâmicas de *downwearing* e *backwearing* nucleados segundo a zonalidade de *knickpoints*.

### Considerações finais

Há, na literatura geomorfológica, diferentes propostas quanto à evolução de escarpamentos situados em posição adjacente a margens continentais passivas. Essas propostas apresentam, por vezes, alguns aspectos divergentes e fazem referência a diferentes áreas do globo.

Para alguns dos autores dessas propostas, na evolução desses escarpamentos é preponderante a atuação de processos de incisão vertical, ao passo que, para outros, a relevância

é o processo de recuo lateral. O presente trabalho, ao buscar contribuir para essa discussão, conclui que, no caso da escarpa da Serra da Mantiqueira mineira, os processos de incisão e de recuo lateral, embora presentes, guardam características mais complexas que aquelas até então registradas na literatura.

As escarpas na área de estudo são marcadas por vales suspensos de diferentes dimensões, e estes estão, frequentemente, associados a capturas fluviais. Depreende-se desse fato que as capturas fluviais constituem o principal deflagrador do rearranjo da drenagem responsável pela evolução das porções altimetricamente mais elevadas acima das escarpas.

Procurou-se demonstrar, ainda, a relevância da atuação conjunta de processos que se alternam no tempo e no espaço, notadamente os processos de downwearing e backwearing junto à zona de knickpoint. Ambos os processos se propagam a remontante ao longo do canal principal e tributários, mas em temporalidades distintas.

De início, o canal principal altimetricamente posicionado acima da escarpa se ajusta ao novo nível de base estabelecido após instalada a captura fluvial, para, posteriormente, o restante de sua bacia ser denudado e rebaixado, quando uma vaga erosiva penetra por seus afluentes. Os vales são conseqüentemente ampliados, ao mesmo tempo em que se intensificam os processos modeladores de vertente, que, por transferirem carga sedimentar em direção aos fundos de vale, causam o entulhamento do canal e de suas margens.

Acredita-se que o quadro geomorfológico aqui descrito não constitui uma particularidade, de modo que muito provavelmente se reproduza em outras regiões escarpadas do Brasil e até mesmo do globo.

## Referências

- BRANDALISE, L. A.; VIANA, H. S. Programa de levantamentos geológicos básicos do Brasil. In: BRANDALISE, L. A.; VIANA, H. S. (Org.). **Folha Rio Pomba**: texto explicativo. Brasília: DNPM/CPRM, 1993. Escala 1:100.000.
- CHEREM, L. F. S.; VARAJÃO, C. A. C.; BRAUCHER, R.; BOURLÈS, D.; SALGADO, A. A. R.; VARAJÃO, A. C. O papel das capturas fluviais na morfodinâmica das bordas interplanálticas do Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 14, n. 4, p. 299-308, 2013.
- CHEREM, L. F. S.; VARAJÃO, C. A. C.; BRAUCHER, R.; BOURLÈS, D.; SALGADO, A. A. R.; VARAJÃO, A. C. Long-term evolution of denudational escarpments in southeastern Brazil. **Geomorphology**, v. 173-174, p. 118-127, 2012.
- GILCHRIST, A. R.; KOOL, H.; BEAUMONT, C. Post-Gondwana geomorphic evolution of southwestern Africa: implications for the controls on landscape development from observations and numerical experiments. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, n. B6, p. 12211-12228, 1994.
- GILCHRIST, A. R.; SUMMERFIELD, M. A. Differential denudation and flexural isostasy in formation of rifted-margin upwarps. **Nature**, v. 346, p. 739-742, 1990.

- GUNNELL, Y.; HARBOR, D. J. Butte detachment: how pre-rift geological structure and drainage integration drive escarpment evolution at rifted continental margins. **Earth Surface Processes and Landforms**, n. 35, p. 1373-1385, 2010.
- MACEDO, J. M. Evolução tectônica da bacia de Santos e áreas continentais adjacentes. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 3, n. 3, p. 159-173, 1989.
- MARENT, B. R.; VALADÃO, R. C. Compartimentação geomorfológica dos planaltos escalonados do sudeste de Minas Gerais-Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 16, n. 2, p. 255-270, 2015.
- MARENT, B. R.; VALADÃO, R. C.; MANFRÉ, L. A.; NÓBREGA, R. A. A.; HENRIQUES, R. J. Interação nível de base e dissecação de bacias hidrográficas no sudeste de Minas Gerais-Brasil. **Revista Caminhos de Geografia**, v. 19, n. 68, p. 215-232, 2018.
- MATHER, A. E. Adjustment of a drainage network to capture induced base-level change: an example from the Sorbas basin, SE Spain. **Geomorphology**, n. 34, p. 271-289, 2000.
- MATMON, A.; BIERMAN, P.; ENZEL, Y. Pattern and tempo of great escarpment erosion. **Geology**, v. 30, n. 12, p. 1135-1138, 2002.
- OLIVEIRA, L. A. F. **A dinâmica fluvial quaternária e a configuração do modelado do relevo no contato entre a Depressão do Rio Pombo e o Planalto de Campos das Vertentes – Zona da Mata de Minas Gerais**. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.
- OLIVEIRA, L. A. F.; COTA, G. E. M.; LIMA, L. B. S.; MAGALHÃES JUNIOR, A. P.; CARVALHO, A. Aplicação da luminescência opticamente estimulada (LOE) como subsídio aos estudos de capturas fluviais Quaternárias: o caso da Serra da Mantiqueira (Zona da Mata de Minas Gerais). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 19, n. 4, p. 679-690, 2018.
- OLIVEIRA, L. A. F.; MAGALHÃES JUNIOR, A. P.; LIMA, L. B. S.; CARVALHO, A. Fatores condicionantes da configuração de fundos de vale colmatados na bacia do alto-médio rio Pombo, leste de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 15, n. 4, p. 639-657, 2014.
- OLLIER, C. D.; PAIN, C. F. Equating the basal unconformity with the palaeoplain: a model for passive margins. **Geomorphology**, n. 19, p. 1-15, 1997.
- PRINCE, P. S.; SPOTILA, J. A.; HENIKA, W. S. New physical evidence of the role of stream capture in active retreat of the Blue Ridge escarpment, southern Appalachians. **Geomorphology**, n. 123, p. 305-319, 2010.
- SALGADO, A. A. R.; MARENT, B. R.; CHEREM, L. F. S.; BOURLÈS, D.; SANTOS, L. J. C.; BRAUCHER, R.; BARRETO, H. N. Denudation and retreat of the Serra do Mar escarpment in southern Brazil derived from in situ-produced <sup>10</sup>Be concentration in river sediment. **Earth Surface Processes and Landforms**, n. 39, p. 311-319, 2014.

- SALGADO, A. A. R.; SOBRINHO, L. C. G.; CHEREM, L. F. S.; VARAJÃO, C. A. C.; BOURLÈS, D.; BRAUCHER, R.; MARENT, B. R. Estudo da evolução da escarpa entre as bacias do Doce/Paraná em Minas Gerais através da quantificação das taxas de desnudação. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 13, n. 2, p. 213-222, 2012.
- SEIDL, M. A.; WEISSEL, J. K.; PRATSON, L. F. The kinematics and pattern of escarpment retreat across the rifted continental margin of SE Australia. **Basin Research**, n. 12, p. 301-316, 1996.
- THOMAS, M. F.; SUMMERFIELD, M. A. Long-term landform development: key themes and research problems. In: GARDINER, V. **International Geomorphology**. Chichester, GB: John Wiley & Sons, 1987. p. 935-956.
- VAN DER BEEK, P.; SUMMERFIELD, M. A.; BRAUN, J.; BROWN, R. W.; FLEMING, A. Modeling postbreakup landscape development and denudational history across the southeast African (Drakensberg Escarpment) margin. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. B12, p. 1-13, 2002.
- VANACKER, V.; BLANCKENBURG, F. V.; HEWAWASAM, T.; KUBIK, P. W. Constraining landscape development of the Sri Lankan escarpment with cosmogenic nuclides in river sediment. **Earth and Planetary Science Letters**, n. 253, p. 402-414, 2007.